专题：中国能源发展战略研究
Study on China's Energy Development Strategy

引用格式：袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 11-22, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20220819002.
Yuan L. Theory and technology considerations on high-quality development of coal main energy security in China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 11-22, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20220819002. (in Chinese)

我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考

袁 亮
安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室 淮南 232001

摘要 煤炭是我国能源安全的保障和压舱石，为了保障我国能源安全的高质量发展，党和国家大力支持煤炭行业的创新发展。文章系统总结了我国在煤炭资源勘探技术、煤与瓦斯共采理论和技术、典型动力灾害风险判识和监控预警技术、综合采掘和智能开采技术与成套装备、煤炭高效清洁利用和煤基清洁能源高效转化技术、煤与新能源多能协同技术6个方面的创新成就，深入分析了目前我国在深部煤炭安全开采、煤矿智能化安全开采、环境安全、粉尘防控与职业健康、煤与共伴生资源单独开采的矛盾、煤炭清洁高效利用关键技术6个方面面临的挑战。基于高质量发展过程中面临的挑战，详细阐明了我国在煤炭智能化绿色安全开采理论与技术、环境安全防护与职业健康理论与技术、煤及共伴生资源精准协同开发理论与技术、煤炭清洁高效利用和碳中和科学发展理论与技术4个方面的未来创新发展方向。以面临的挑战和未来创新发展方向为抓手，深入开展基础理论研究和关键技术攻关，实现煤炭智能安全精准开采和清洁高效利用，助力我国主体能源科技的创新发展。

关键词 能源安全，煤炭智能精准开采，清洁高效利用，碳中和科学发展

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220819002

我国是全球最大的能源消费国和生产国，能源是我国经济繁荣和可持续发展的前提与重要支撑，经济的可持续发展与能源的需求紧密相关[1]。2021年我国煤炭消费占一次能源消费的56%左右，从近年来的煤炭消费占比可知，我国煤炭消费占比虽然在逐年降低，但是煤炭消费总量仍然逐年增大。习近平总书记多次强调："富煤贫油少气是我国的国情，以煤为主的能源结构短期内难以根本改变"，这说明我国煤炭消费占比在相当长一段时间内仍占主导作用。煤炭保障了我国能源安全与经济的高质量发展，图1为我国

资助项目：中国工程院重大咨询项目（2022-XBZD-09）
修改稿收到日期：2022年10月12日

近17年的煤炭产量、煤炭百万吨死亡率和国内生产总值（GDP）的发展趋势。从图1中可以看出，我国的煤炭百万吨死亡率逐年降低，从2005年的2.76降低至2021年的0.044，相对减少了62.73倍；我国的煤炭产量呈波动变化，总体呈增加趋势，从2005—2014年持续增长，从2014—2016年煤炭产量有所下降，2016年后煤炭产量又有所反弹，2005—2021年煤炭产量总体相对增加了1.92倍；我国GDP总量也在逐年增大，从2005年的18.73万亿增至2021年的114.4万亿，相对增大了6.11倍。

我国主体能源的高质量发展是保障我国能源安全的重要前提，是实现能源产业可持续发展的根本，同时也是关系国家经济社会发展的全局性和战略性问题。基于我国能源资源的禀赋特征和碳达峰与碳中和（以下简称“双碳”）目标的背景，我国能源安全的高质量发展必须走“清洁、高效、安全、可持续”的科学发展道路，呼唤主体能源安全智能精准开采和绿色清洁高效利用，引领能源安全、绿色、低碳的长期发展。在“双碳”目标的背景下，煤炭作为我国主体能源，要按照绿色低碳的发展方向，对标实现碳达峰、碳中和目标任务，立足国情、控制总量、兜住底线，有序减量替代，推进煤炭消费转型升级，而“双碳”目标的规划也对我国主体能源安全的保障带来了新要求[2]。同时，国际局势动荡，新冠肺炎疫情及俄乌冲突等不确定因素加大了国际能源的市场波动，全天候的能源保障和供给成为能源行业发展的重要目标。基于当前的国际形势和能源背景，实现“双碳”目标需要大力发展新能源，而根据谢和平等[3]研究表明，新能源消费占比提升到49%，至少需要30年的时间。由此可知，新能源在未来相当长的时期内无法取代常规能源，以国内相对富裕的煤炭为主是保障国家能源安全的现实选择，煤炭在我国能源安全基础性保障地位短期内难以根本改变，是我国能源安全的压舱石。

近年来，党和国家高度重视我国主体能源的创新发展，先后成立了多个国家重点实验室、国家工程研究中心等研究机构，专门从事煤炭工业科技的创新研究。本文是笔者在近5年内承担和参加的科学技术部、国家能源局和中国工程院等资助的项目研究过程中，基于对我国主体能源发展取得的成就和面临的挑战的分析，对我国主体能源安全高质量发展的思考，以期为我国“双碳”目标的实现和能源经济的稳步发

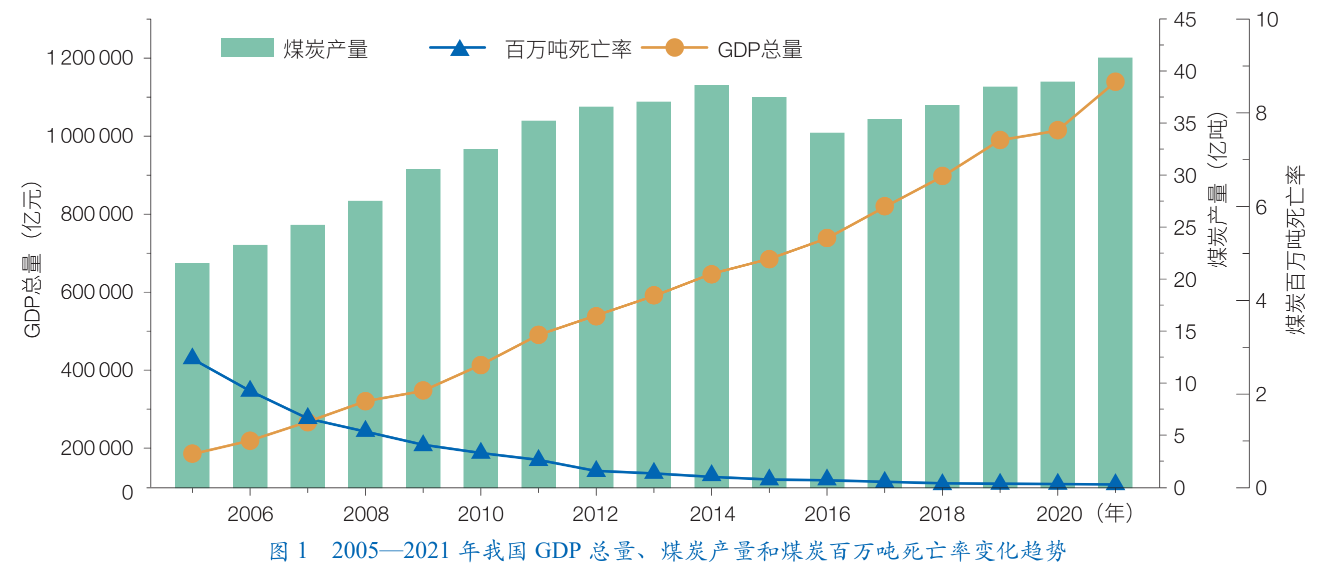


图1　2005—2021年我国GDP总量、煤炭产量和煤炭百万吨死亡率变化趋势

Figure 1　Trend of China's total GDP, coal production and coal mortality rate per million tons from 2005 to 2021

数据来源：国家统计局

Source: National Bureau of Statistics of China

展提供参考。

1 我国主体能源创新发展成就显著

在党和国家的大力支持下，经过几代人的努力和创新，我国主体能源的发展在6个方面取得了显著的成就，为我国主体能源安全的高质量发展奠定了坚实的基础。

成就1：经过几代人的努力，我国初步形成了以煤炭资源勘探技术为核心的煤矿地质保障体系。我国在煤炭资源勘探方面形成了以“地震主导-多手段配合-井上下联合”的勘探方法，其中以高分辨三维地震勘探技术为核心，构建了综合立体式物探技术[4]。该技术由于其精度高、成本低和探测速度快的特点，在我国煤炭资源勘探方面得到了广泛的应用，显著提升了我国煤炭综合勘查的效率。基于综合立体式的煤炭勘探技术，我国初步形成了井上下一体和采前采中相互协同作用的煤矿地质保障技术体系。

成就2：基于20多年的艰难探索，我国煤与瓦斯共采技术达到国际领先水平。我国煤与瓦斯共采技术方法主要包括三大类——巷道法煤与瓦斯共采、留巷钻孔法无煤柱煤与瓦斯共采、地面钻井法煤与瓦斯共采，三类技术方法适用于不同开采条件煤层[5]。其中地面钻井法煤与瓦斯共采技术较为常用，其主要包括煤气共采的“淮南模式”和先抽后采的“晋城模式”，“淮南模式”的煤与瓦斯共采技术主要适用于复杂地质条件的低透气性煤层群的卸压开采、采动区临近层的卸压瓦斯抽采和采空区瓦斯抽采[6]，“晋城模式”的煤与瓦斯共采技术主要适用于地质构造简单和渗透性较高的坚硬煤层。

成就3：经过对基础理论的深入探索和大量的工程试验研究，我国煤矿典型动力灾害风险判识和监控预警技术取得重大进展。笔者团队围绕“煤矿典型动力灾害风险判识和监控预警技术”这一重大关键科学问题，以冲击地压和煤与瓦斯突出这两种典型动力灾害为抓手，开展了冲击地压和煤与瓦斯突出的灾变机理及监测预警系统平台的研究[7]。研究结果阐明了冲击地压和煤与瓦斯突出的多场耦合诱发机制，并基于此构建了多元海量信息的大数据分析与挖掘的监控预警模型和云平台。该项成果已被国家矿山安全监察局应用到国家煤矿安全生产风险监测预警系统中，实现了对3 300余座矿井安全监测数据的联网与预警。

成就4：经过数十年的发展，我国在综合采掘技术与成套装备的研发方面获得重大进展，并基于此在智能开采技术及装备方面也取得历史性突破。自“十五”以来，经过20多年的发展，我国在全煤层开采技术和装备方面取得重大突破。针对薄煤层开采，开创了0.8—2.0 m的全自动化无人开采薄煤层刨煤机安全高效开采技术模型，实现了高瓦斯或突出煤层的安全高效开采[8]。针对厚煤层开采，研发了浅埋煤层8.8 m一次采全高综采关键技术与成套装备，成功研制了14—20 m的特厚煤层大采高综采关键技术与成套装备，显著提高了我国煤层开采效率和采收率[9]。经过持续的科研攻关，我国成功研制了智能化、无人化的开采技术及成套装备。2013年，在黄陵一号煤矿的1001工作面首次开展了智能化开采的现场试验工作，试验效果显著。在黄陵一号煤矿试验成功的基础上，我国已有近千个采煤工作面推进实施了智能化、无人化开采技术，使我国在煤矿开采方面初步实现了“有人巡视，无人值守”的全自动化开采模式[10]。

成就5：历经20余年的科研攻关，我国在煤炭高效清洁利用与煤基清洁能源高效转化技术方面取得显著进步。在燃煤发电技术方面，成功研制出了百万千瓦级600℃超超临界燃煤发电技术和成套装备，新型燃煤发电技术在减煤降碳方面效果显著，大幅提升了我国燃煤电厂的热能利用率，该设备已在全国推广应用。在低浓度瓦斯燃烧利用方面，成功研制了全球首套3%—9%煤矿低浓度瓦斯安全稳定燃烧装置，入选了国家能源局2021年度能源领域首台（套）重大技术

装备项目清单。该设备的成功研制标志着我国自主创新实现了1%—100%全浓度的甲烷利用。基于降碳增效发展方向的背景，我国大力发展煤基能源高效转化利用技术，建成了全球单体规模最大的400万吨/年的煤间接液化项目，且能够实现安全稳定清洁运行，该技术填补了多项国内空白，打破了国外的技术垄断。

成就6：在煤炭开采利用和新能源快速发展的基础上，我国在煤与新能源多能协同技术方面实现突破。煤与新能源多能协同是构建互补现代能源体系的关键环节，在此背景下，我国成功构建了抽水蓄能+多能互补分布式智慧能源系统，提出了“国家级废弃矿洞地下空间储能云”战略构想。在“光伏发电-电解水制氢-合成氨-氨输运-煤掺氨燃烧”五位一体技术方面取得了突破性进展，国内首创的8.3 MW纯氨燃烧器一次点火成功。

2 我国主体能源安全高质量发展依然面临诸多挑战

随着煤炭浅部资源的枯竭，我国煤炭的开采深度以每年10—25 m的速度向深部蔓延，煤矿开采进入深部后面临的科学问题和技术难题更为复杂[11,12]。在2016年全国科技创新大会上，习近平总书记提出“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”[13]。近年来，我国科技投入逐渐增加，法律法规逐渐健全，安全监管不断加强，产能结构不断优化，煤矿的事故发生率也在逐渐降低[14]。但在深部煤炭开采过程中，伴随着智能安全开采问题、环境安全问题、粉尘防控与职业安全健康问题、煤与共伴生资源的开采矛盾及煤与瓦斯的清洁高效利用问题等依然较为严峻。

挑战1：随着浅部煤炭资源的枯竭，我国面临深部煤炭开采的挑战，而深部煤炭安全开采形势依然严峻。我国的煤炭开采主要以井工开采为主，由于我国特殊的地质特征，随着开采深度的增加，煤层赋存和开采环境较为复杂，且在开采过程中面临多重灾害的威胁，各类灾害相互影响，严重危害煤矿的安全生产[15]。2021年，我国煤矿共发生事故90余起，死亡百余人，较大以上的事故仍然时有发生。同时，2021年我国煤矿百万吨死亡率仍是美国的2—3倍，与发达国家仍存在一定的差距。而伴随着煤矿开采进入深部，我国可供开采的绿色煤炭资源量变得更为有限，在可见的未来或将逐渐进入非绿色煤炭赋存区的开采，非绿色煤炭赋存区开采面临的安全问题更为复杂严峻。我国目前探明的1 000 m以深的煤炭资源量占比约为53%，当前我国煤炭产量的30%来自深部开采，最大采深已达1 500 m[15]。在未来10—20年，包括西部在内的全国70%煤炭产能都将进入深部开采。而深部开采面临的煤与瓦斯突出、冲击地压等多种灾害威胁更大，日本、英国、德国等国家相继关井，我国需要迎难而上。

挑战2：煤矿智能化安全开采技术水平亟待提高。自改革开放以来，我国煤矿开采从炮采、普采跨越到了煤矿机械化、自动化开采，并逐渐向智能化、无人化开采迈进。煤矿的智能化和无人化程度决定了我国煤矿安全开采的水平，我国井工煤矿在采煤和掘进的机械化、自动化程度已分别达到78.5%、60.4%，大型煤矿企业的机械化程度更是达到98%以上[16]。但是，目前全国只有不到1 000个采掘工作面推进实施智能化和无人化技术，煤矿智能化、无人化开采是机械化、自动化开采的进一步创新和发展，是我国煤矿安全生产变革的新方向，将会有效促进我国主体能源安全高质量发展[17]。因此，我国煤矿亟须发展智能化安全开采技术，提高和推进全国煤矿智能化、无人化开采水平。

挑战3：由于煤矿开采引起的环境危害日益严重，环境安全亟待改善。对大气环境的影响方面，煤矿开采伴随着瓦斯气体的排放，井下开采过程中瓦斯利用率较低，大部分瓦斯直接排放到大气中。而瓦斯也是一

种温室气体，其引起的温室效应是二氧化碳的21倍左右[18]。除瓦斯外，煤矿开采过程中还伴随着大量粉尘的产生和排放，进而造成雾霾现象。对水资源的影响方面，在煤矿开采过程中会利用大量的水资源，绝大部分矿井水直接排放，回用率较低，造成大量水资源的浪费，而大量水资源的浪费也会造成矿井周围的水土流失和环境污染。对生态环境和土地资源的影响方面，煤矿开采过程中会伴随着煤矸石的排放和堆积，煤矸石的堆积占用了大量的公用土地，且煤矸石的自燃会产生大量的二氧化硫和二氧化碳等有毒有害气体，影响矿区周围的生态平衡。煤矿的过度开采也会导致矿区周围的土地塌陷，进而造成植被破坏和地表沙化等问题，严重危害矿区周围居民的生活和安全（图2）。

挑战4：粉尘防控一直是煤矿开采过程中的难题，由粉尘引起的职业安全健康问题不容忽视。截至2021年，全国累计报告职业病例约为102.5万例①。其中，职业性尘肺病例约为91.5万例，占比约为89.27%，且每年新增煤工尘肺病例仍然高居不下②。图3为2008—2021年我国职业病、煤工尘肺病和尘肺病占比的变化趋势。从图3中可以看出，我国



图2　煤矿开采引发的环境安全问题

Figure 2　Environmental safety issues caused by coal mining

（a）水土流失与污染；（b）开采引起地表塌陷；（c）矿区雾霾；（d）酸雨

(a) Soil erosion and pollution; (b) Surface subsidence caused by mining; (c) Haze; (d) Acid rain

① 2021年我国卫生健康事业发展统计公报. (2022-07-12). http://www.gov.cn/xinwen/2022-07/12/content_5700670.htm.

② 国家卫生健康委员会2022年4月25日新闻发布会文字实录. (2022-04-25). http://www.nhc.gov.cn/xcs/s3574/202204/2fbf355668df4fd0ade8b5c3cf455f95.shtml.

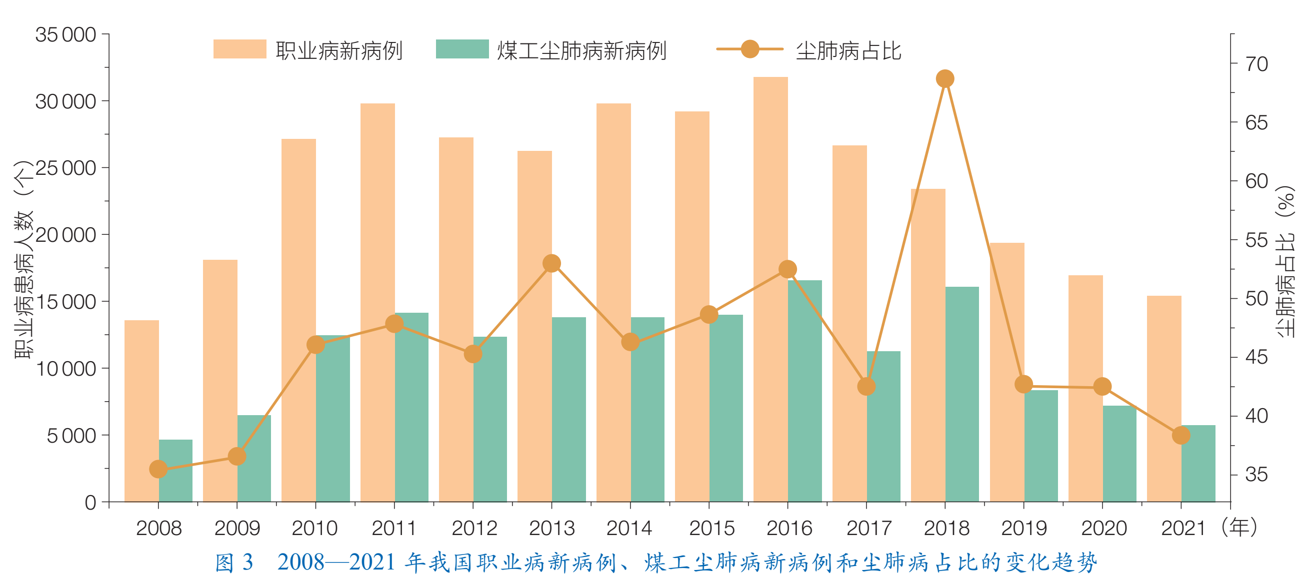


图 3　2008—2021 年我国职业病新病例、煤工尘肺病新病例和尘肺病占比的变化趋势

Figure 3　Trend of occupational diseases, coal workers' pneumoconiosis and proportion of pneumoconiosis in China from 2008 to 2021

数据来源：国家卫生健康委员会

Source: China National Health Commission

每年的煤工尘肺病例呈波动增大，且每年煤工尘肺病例基本占总职业病例的 40% 以上。2020 年全国因煤工尘肺死亡人数较多，约是煤矿生产事故死亡人数的 17 倍，煤矿粉尘已成为危害安全生产和矿工健康的“头号杀手”。

挑战 5：我国聚煤盆地伴生多种资源，煤与共伴生资源单独开采的矛盾日益突出。我国聚煤盆地赋存煤炭的同时，伴生着丰富的煤层气、天然气、致密砂岩气、石油、铀等油气资源。煤及共伴生资源开采过程涉及多相多物理场的复杂耦合作用，煤炭开采和共伴生资源开采相互作用、相互影响[19]。煤炭开采过程中引发的煤与瓦斯突出、冲击地压等典型动力灾害对共伴生资源的开发影响剧烈，同时油气开采过程中的井喷、气窜等也会影响煤炭开采。资源开发时序不合理则会破坏其他能源的赋存及稳定开采状态，甚至造成井漏、天然气泄漏爆炸等安全事故，导致能源回收率低且安全风险较大。

挑战 6：在“双碳”目标背景下，我国煤炭清洁高效利用关键技术亟待提高。面对“双碳”目标，煤炭作为我国的主体能源必须走清洁高效利用的道路。尽管当前煤炭消费占比逐渐降低，但是将煤炭直接燃烧利用占煤炭消费总量的 80% 以上。我国目前在燃煤工业领域仍然具有燃煤利用率低、排放污染严重和技术装备落后的缺点[20]。当前我国的煤炭清洁高效利用技术科技支撑相对不足，基础研究相对薄弱，关键核心技术相对落后。因此，在“双碳”背景下，我国亟须优化煤炭清洁高效利用方式和路径，研发煤炭清洁高效利用关键技术和成套装备，促进我国主体能源的高质量发展[21]。

3 未来创新的发展方向

上述研究内容阐述了近年来我国主体能源发展过程中取得的成就和面临的挑战。回顾过往，笔者经过多年思考，提出我国主体能源安全高质量的发展必须走安全智能精准开采之路。当今社会，新一轮科技革命和产业变革正在重构全球创新版图，以人工智能、云计算、大数据、物联网、“互联网+”等为代表的新一代信息技术正在快速发展，我国主体能源的开发

和利用必须踏上新一代的信息革命之路，让信息技术为主体能源高质量发展赋能。早在2016年笔者就提出了煤炭精准开采的科学构想，煤炭精准开采将引领主体能源的高质量发展，改变传统能源发展格局，重塑主体能源发展战略。煤炭精准开采是以透明地球物理和多物理场耦合理论为基础的智能化、无人化开采新技术，涉及多个关键科学问题和技术难题。基于这一理念，我们必须统筹考虑不同地质条件下煤炭开采扰动的影响因素、致灾机理及开采引发的生态环境的负外部性等，创建时空上准确高效的煤炭无人（少人）智能开采与灾害防控一体化的煤炭开采新模式[15]。

实现这一理念，必须加强相关基础研究与关键技术攻关。以工程实际为背景，从工程问题中提炼关键科学问题，采用现场工程试验和数据收集、大型物理模拟实验、数值仿真与模拟验证的“三位一体”综合科学研究方法（图4），以煤炭智能化绿色安全开采理论与技术、环境安全防护与职业健康理论与技术、煤及共伴生资源精准协同开发理论与技术、煤炭清洁高效利用和碳中和科学发展理论与技术为主要研究方向，深入开展基础理论研究和关键技术攻关，为我国主体能源科技创新发展提供理论和技术支撑。

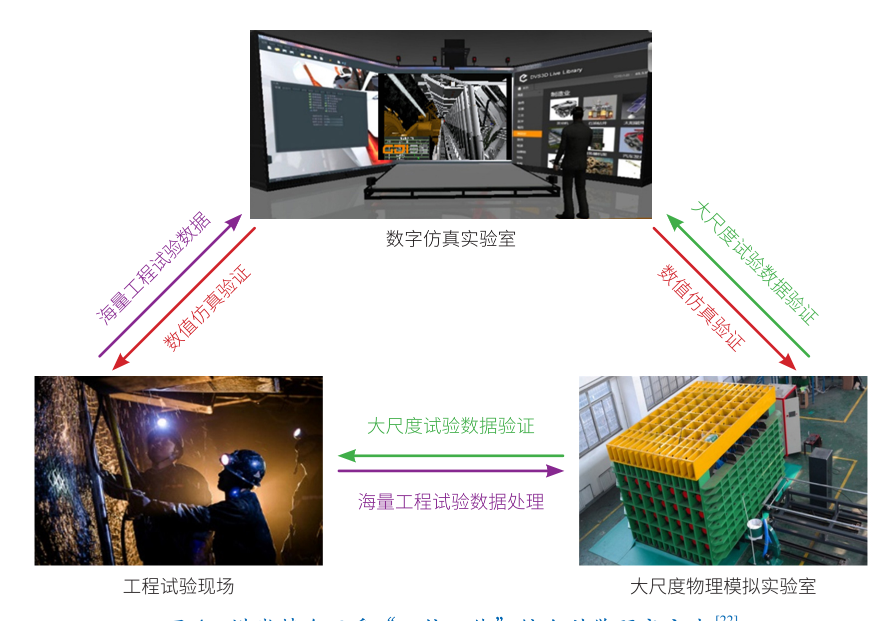


图4　煤炭精准开采“三位一体”综合科学研究方法[22]

Figure 4　Integrated trinity scientific research approach for coal precision mining[22]

3.1 煤炭智能化绿色安全开采理论与技术

（1）理论研究。煤矿的智能化和无人化程度表明了我国矿井现代化的水平，也决定了安全开采的能力。煤矿智能化绿色安全开采主要涉及两大理论：① 透明地球物理基础理论，该理论是以微震监测技术、CT扫描技术、VR可视化技术、“互联网+”等技术为基础，研究具有全方位可视化的矿山开采理论方法，真实反演矿山地质概况及瓦斯赋存等情况；② 采动煤层多场耦合致灾基础理论，煤矿开采过程中涉及煤体应力场、裂隙场、瓦斯扩散场、渗流场、温度场和化学场等多物理场的复杂耦合作用，各物理场交叉作用，相互影响。这两大理论是研究煤矿智能化绿色安全开采的前提条件，在两大理论研究的基础上开展相关技术与装备的研究。

（2）关键技术与装备。煤矿智能化绿色安全开采主要涉及5个方面的关键技术与装备的研究：① 智能精准开采关键技术与装备，主要涉及智能综采技术与装备、智能巷道掘进技术与装备、智能钻抽技术与装备、智能输运技术与装备、智能调控技术与装备5个方向的研究。② 智能感知与多网融合技术装备，主要涉及采掘扰动区的信息传感技术装备、采掘扰动区的全方位监测布控技术装备、非接触式抗干扰高性能传感技术装备、多种灾害前兆信息采集与传输分析技术装备4个方向的研究。③ 动态信息挖掘与融合处理技术，主要涉及多源海量信息的融合技术与方法、构建海量数据挖掘模型及灾害预警知识体系关键技术与方法、潜在灾害预测技术与方法、典型动力灾害危险区域快速识别技术与方法4个方向的研究。④ 动力灾害监控预警技术与装备，主要涉及煤矿采掘扰动应力、瓦斯压力、构造特征参数

及煤岩力学参数等多参量信息的识别和分析技术与方法，构建监控预警云平台。⑤ 智慧矿山建设标准与技术体系，以采矿工程、安全工程、岩石力学、渗流力学和损伤力学为基础，结合信息学、大数据和互联网等信息技术，构建“互联网+智慧矿山”技术体系。

3.2 环境安全防护与职业健康理论与技术

煤炭开采过程中会伴随着地表沉陷、水土流失、瓦斯和粉尘的排放等环境有害因素的发生，影响矿工的职业健康和矿区周围的生态环境。构建环境安全防护技术体系和职业健康理论是煤炭安全开采的重要前提和保障[23]。

（1）理论研究。煤炭开采中的环境安全防护主要涉及3个方面的理论：① 煤矿低损伤开采力学与控制理论，主要涉及煤矿低损伤开采的力学机制、低损伤开采过程中的多场耦合特性、低损伤开采的影响机制3个方向的研究。② 煤炭开采污染机理及生态响应机制，主要涉及煤炭开采污染源产生机理、煤炭开采污染源对环境的影响机制2个方向的研究。③ 煤炭保水开采基础理论与关键技术，主要涉及煤炭开采过程中上覆岩层的裂隙演化特征、开采扰动作用下覆岩裂隙水渗流动态演化特征、采掘扰动工作面涌水监测预警技术3个方向的研究。

（2）关键技术与装备。煤炭开采中的环境安全防护主要涉及4个方面关键技术与装备的研究：① 井下采选充一体化开采技术及装备，主要涉及井下采选充协同开采关键技术、井下采选充一体化开采装备2个方向的研究。② 井下精准局部充填开采技术与装备，主要涉及精准充填技术、充填材料的研制技术及方法、局部充填的监测监控技术及装备3个方向的研究。 ③ 覆岩离层注浆减沉关键技术与装备，主要涉及覆岩离层裂隙带探测技术、覆岩离层注浆填充技术与装备、覆岩离层注浆减沉的监测监控技术与装备3个方向的研究。④ 煤矿开采过程污染物防控关键技术，主要涉及煤炭开采过程中固体污染物的防控技术、煤炭开采过程中气体污染物的防控技术、煤炭开采过程中防止水资源和土壤污染的关键技术3个方向的研究。

（3）职业健康防护。煤炭开采中的职业健康防护主要涉及6个方面的研究：① 粉尘产尘机制及时空演化规律，主要涉及粉尘的产尘来源、粉尘的运移特性、粉尘的润湿特性、压抽混合强气流扰动下粉尘产运的时空演化特征4个方向的研究。② 粉尘智能监测预警理论与技术，主要涉及粉尘高性能传感器制备理论和方法、复杂产尘环境多源信息融合分析技术、矿井环境分布式时空监测预警技术3个方向的研究。③ 粉尘高效智能防控理论与技术，主要涉及采掘工作面产尘区域的监测及精准防控技术、不同开采条件下粉尘产尘特性及精准控制技术、产尘区域干雾除尘智能控制技术及装备3个方向的研究。④ 职业危害接触限值与致病机制，主要涉及致病粉尘诱发人体组织病变的接触限值、煤工尘肺细胞等多组态样本库的构建、病变样本的大数据分析、影响人体组织病变的主要控制因素及致病机制4个方向的研究。⑤ 职业危害研判与快速筛查技术，主要涉及煤工尘肺基因的快速判别和筛查技术、煤工尘肺损伤程度的判别技术2个方面的研究。⑥ 职业危害智慧诊疗理论与技术，主要涉及基于物理、化学、生物医学等多学科交叉的智能检测和监测理论及方法，基于血液、尿液和唾液等多样本多元素的快速研判及治疗技术和装备，以及基于不同尘肺损伤程度的精准治疗技术和装备3个方向的研究。

3.3 煤及共伴生资源精准协同开发理论与技术

煤及共伴生资源的精准协同开发是符合新时代国家能源战略需求，保障国家能源安全高质量发展的关键环节。煤及共伴生资源的精准协同开发可以有效解决煤与共伴生资源的单独开采矛盾、资源开发过程中的多场耦合作用灾害以及能源资源的采收率低等问题，是我国未来能源资源开发的主导方向[18]。

煤及共伴生资源的精准协同开发主要涉及5个方面的研究：① 煤铀资源精准协同开发流固耦合基础理论，主要涉及开采扰动作用下煤岩体的动态损伤演化机制及渗流特性、协同开发过程中应力场-损伤场-化学场-能量场多物理场的时空演化特征2个方向的研究。② 煤与油气精准协调开发多场耦合基础理论，主要涉及非均质煤岩体多孔介质中的多相多场流体运移规律、协同开发过程中应力场-损伤场-流体运移场-化学场-能量场多物理场的复杂耦合机制及致灾机理2个方向的研究。③ 煤及共伴生资源精准协调开发协同机制与方法，主要涉及构建煤及共伴生资源精准协调开发的综合评价模型、阐明煤及共伴生资源精准协调开发机制及开发工序2个方向的研究。④ 煤及共伴生资源安全高效开发关键技术与装备，主要涉及煤岩体的高效增透技术及盖层防护体系、液态二氧化碳压裂和驱油气的关键设备研发2个方向的研究。⑤ 煤及共伴生资源开发灾害防控与智能预警平台，主要涉及油气管道的智能监测监控技术、含铀溶浸液及氡运移控制理论、基于多参量的数据挖掘智能预警防控技术3个方向的研究。

3.4 煤炭清洁高效利用及碳中和科学发展理论与技术

在“双碳”目标背景下，为了保证我国主体能源安全高质量发展，必须走煤炭清洁高效利用以及科学的碳中和发展之路。煤炭的清洁高效利用既能满足我国能源的安全，又能促进“双碳”目标的发展，同时也是我国社会主义生态文明建设的关键环节[16]。

煤炭的清洁高效利用主要涉及6个方面的研究：① 超超临界煤电燃烧基础理论，主要涉及超超临界煤电高效燃烧理论、超超临界煤电高效传热理论、超超临界煤电高效热转化理论和技术3个方向的研究。② 干法与细颗粒级煤分选技术，主要涉及大型复合和块煤干法分选理论及技术、大型复合式干法流化床分选理论和技术、构建气固流态化和模块式高效干法分选系统3个方向的研究。③ 低品阶煤分级高效提质技术，主要涉及大型低品阶煤高效分质分级利用技术、低品阶混煤高效热解技术、构建低品阶煤分级高效利用技术体系3个方向的研究。④ 煤液化气化现代煤化工技术，主要涉及大型水煤浆高效气化关键技术、干煤粉气流床高压气化关键技术、煤直接和间接高效液化技术、超厚超大煤化工成套设备的设计与制造、构建现代化煤化工技术体系5个方向的研究。⑤ 煤基多联产系统的集成技术，主要涉及煤基多联产的基础理论、煤基多联产系统的耦合机制、煤基多联产系统的关键集成技术3个方向的研究。⑥ 煤利用污染物协同控制技术，主要涉及燃煤烟气污染物的高效快速脱除技术、燃煤烟气的净化装置、大型燃煤工业领域烟气脱硫除尘关键技术、现代煤化工污染物高效深度控制关键技术、固体废物高附加值利用技术5个方向的研究。

煤炭的清洁高效利用依托于我国科学的碳中和发展战略体系，主要包括：碳中和新型能源体系、全网节能的管理体系、多元化绿色金融体系、碳排放交易优化机制、碳中和行为激励机制、低碳化发展制度体系、碳排放管理标准体系等成套的管理及发展体系。加强碳中和行为激励机制与碳排放优化研究，构建煤矿区碳中和科学发展技术理论体系，为我国碳中和目标的实现提供保障。

4 展望

随着我国煤炭精准开采与清洁高效利用不断发展，力争用最少的煤矿数量、最少的开采面积、最少的煤炭消费量支撑国家的能源需求，加快构建清洁、高效、安全、可持续的现代能源体系，为保障我国能源安全、推动经济社会高质量发展作出重要贡献。以我国主体能源发展取得的成就为根基，依托于我国主体能源发展面临的挑战和未来创新发展方向，力争2025年，主体能源高质量发展取得重大突

破；2030 年，主体能源高质量发展目标基本实现；2050 年，主体能源高质量发展全面实现。

参考文献

1 谢和平, 王金华, 王国法, 等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1187-1197.
Xie H P, Wang J H, Wang G F, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1187-1197. (in Chinese)

2 刘峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1-15.
Liu F, Guo L F, Zhao L Z. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1-15. (in Chinese)

3 谢和平, 任世华, 谢亚辰, 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197-2211.
Xie H P, Ren S H, Xie Y C, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211. (in Chinese)

4 袁亮, 张平松. 煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2277-2284.
Yuan L, Zhang P S. Development status and prospect of geological guarantee technology for precise coal mining. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2277-2284. (in Chinese)

5 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1-6.
Yuan L. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1-6. (in Chinese)

6 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系. 煤炭学报, 2009, 34(1): 1-8.
Yuan L. Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 1-8. (in Chinese)

7 袁亮. 煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术研究进展. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1557-1566.
Yuan L. Research progress on risk identification, assessment, monitoring and early warning technologies of typical dynamic hazards in coal mines. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1557-1566. (in Chinese)

8 杨生华, 周永昌, 芮丰, 等. 薄煤层开采与成套装备技术的发展趋势. 煤炭科学技术, 2020, 48(3): 49-58.
Yang S H, Zhou Y C, Rui F, et al. Development trend of thin coal seam mining and complete equipment technology. Coal Science and Technology, 2020, 48(3): 49-58. (in Chinese)

9 杨俊哲. 8.8 m 智能超大采高综采工作面关键技术与装备. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 116-124.
Yang J Z. Key technologies and equipments for 8.8 m intelligent super large mining height fully-mechanized mining face mining. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 116-124. (in Chinese)

10 王国法, 刘峰, 孟祥军, 等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 1-36.
Wang G F, Liu F, Meng X J, et al. Research and practice on intelligent coal mine construction (primary stage). Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 1-36. (in Chinese)

11 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716-725.
Yuan L. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716-725. (in Chinese)

12 王恩元, 张国锐, 张超林, 等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望. 煤炭学报, 2022, 47(1): 297-322.
Wang E Y, Zhang G R, Zhang C L, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 297-322. (in Chinese)

13 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 1-8.
Xie H P, Gao F, Ju Y, et al. Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(1): 1-8. (in Chinese)

14 王德明. 煤矿热动力灾害及特性. 煤炭学报, 2018, 43(1): 137-142.

Wang D M. Thermodynamic disaster in coal mine and its characteristics. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 137-142. (in Chinese)

15 袁亮. 煤炭精准开采科学构想. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1-7.
Yuan L. Scientific conception of precision coal mining. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1-7. (in Chinese)

16 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1-15.
Liu F, Cao W J, Zhang J M, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1-15.

17 王国法, 任世华, 庞义辉, 等. 煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 1-8.
Wang G F, Ren S H, Pang Y H, et al. Development achievements of China’s coal industry during the 13th Five-Year Plan period and implementation path of “dual carbon” target. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 1-8. (in Chinese)

18 李树刚, 张静非, 尚建选, 等. 双碳目标下煤气同采技术体系构想及内涵. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1416-1429.
Li S G, Zhang J F, Shang J X, et al. Conception and connotation of coal and gas co-extraction technology system under the goal of carbon peak and carbon neutrality. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1416-1429. (in Chinese)

19 袁亮. 煤及共伴生资源精准开采科学问题与对策. 煤炭学报, 2019, 44(1): 1-9.
Yuan L. Scientific problem and countermeasure for precision mining of coal and associated resources. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 1-9. (in Chinese)

20 吕清刚, 李诗媛, 黄粲然. 工业领域煤炭清洁高效燃烧利用技术现状与发展建议. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 392-400.
Lyu Q G, Li S Y, Huang C R. Current situation and development suggestions of coal clean and efficient combustion technology in industry field. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 392-400. (in Chinese)

21 高天明, 张艳. 中国煤炭资源高效清洁利用路径研究. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 157-164.
Gao T M, Zhang Y. Study on high efficient and clean utilization ways of China’s coal resources. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 157-164.

22 袁亮. 我国煤炭工业安全科学技术创新与发展. 煤矿安全, 2015, 46(S1): 5-11.
Yuan L. Innovation and development of safety science and technology in coal industry of China. Safety in Coal Mines, 2015, 46(S1): 5-11. (in Chinese)

23 袁亮. 煤矿粉尘防控与职业安全健康科学构想. 煤炭学报, 2020, 45(1): 1-7.
Yuan L. Scientific conception of coal mine dust control and occupational safety. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 1-7. (in Chinese)

Theory and Technology Considerations on High-quality Development of Coal Main Energy Security in China

YUAN Liang

（State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China）

Abstract Coal is the ballast of energy security in China. In order to guarantee the high-quality development of energy security, China strongly supports the innovative development of coal industry. This study systematically summarizes the innovative achievements of China in six aspects, i.e., coal resource exploration technology, coal and gas co-mining theory and technology, typical dynamic disaster risk identification and early warning monitoring technology, integrated mining and intelligent mining technology and equipment, coal high-efficiency and clean utilization and coal-based clean energy high-efficiency conversion technology, coal and new energy multi-energy synergy technology. The study deeply analyzes the current challenges faced in above mentioned six aspects, namely, safe mining of deep coal, intelligent and safe mining of coal mines, environmental safety, dust prevention and control and occupational health, contradiction of separate mining of coal and co-associated resources, and key technologies for clean and efficient utilization of coal. Based on the challenges faced in the process of high-quality development in China, the study clarifies the future innovative development directions in four areas in detail, i.e., coal intelligent green and safe mining theory and technology, environmental safety protection and occupational health theory and technology, coal and co-associated resources precise and synergistic development theory and technology, coal clean and high-efficiency utilization and carbon neutral scientific development theory and technology. Taking the challenges faced and the future innovation development direction as the grasp, the study carries out the basic theory and key technology research to realize the intelligent and safe and accurate mining and clean and efficient utilization of coal and boost the innovation development of the main energy science and technology in China.

Keywords energy security, intelligent and precise mining of coal, clean and high-efficiency utilization, carbon neutral science development

袁 亮 中国工程院院士。安徽理工大学校长，中国工程科技发展战略安徽研究院院长。主要研究领域：煤与瓦斯共采、煤炭安全智能精准开采、动力灾害防控、粉尘防控与职业安全健康等。E-mail: yuanl_1960@sina.com

YUAN Liang Academician of Chinese Academy of Engineering, President of Anhui University of Science and Technology, President of Anhui Research Institute of China Engineering Science and Technology Development Strategy. His main research fields cover coal and gas co-mining, coal safety intelligent precision mining, dynamic disaster prevention and control, dust prevention and control and occupational safety and health, etc. E-mail: yuanl_1960@sina.com

■责任编辑：张帆